

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-196296

(43)Date of publication of application : 12.07.2002

---

(51)Int. Cl.

G02F 1/035

G02B 6/12

---

(21)Application number : 2000-392456 (71)Applicant : MITSUBISHI ELECTRIC CORP

(22)Date of filing : 25.12.2000 (72)Inventor : KANEKO SHINICHI

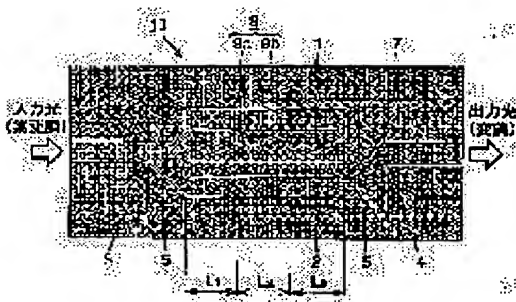
---

(54) OPTICAL MODULATOR

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical modulator for outputting an optical signal which is faithful to the wave form of an electric signal with a simple structure.

SOLUTION: The optical modulator is provided with a branching part 3, two optical waveguides 1 and 2 which are branched from the branching part, electrodes 5 and 7 which apply an electric field to at least one of the two optical waveguides, and a synthesizing part 4 for synthesizing optical beams which has respectively propagated through the two optical waveguides. The two optical waveguides is provided with optical waveguides of a photonic crystal 9 in which two or more optical media form a periodic structure.



---

[Claim(s)]

[Claim 1] The optical modulator which was equipped with the electrode which impresses electric field to one [ at least ] optical waveguide of a tee, two optical waveguides which branched from the aforementioned tee, and the two aforementioned optical waveguides, and the multiplexing section which makes it multiplex the light which spread the two aforementioned optical waveguides, respectively, and the two aforementioned optical waveguides equip with the optical waveguide of the photograph nick crystal into which the medium of two or more kinds of light comes to form periodic structure.

[Claim 2] The optical modulator according to claim 1 which is the optical waveguide which at least one side of the two aforementioned optical waveguides equips with the delay-line section for delaying a lightwave signal.

[Claim 3] The optical modulator which branches from a tee and the aforementioned tee and is equipped with the 1st optical waveguide equipped with the photograph nick crystal two or more kinds of whose media come to form periodic structure, the 2nd optical waveguide which has a different crystalline array from the 1st optical waveguide of the above, and the electrode which impresses electric field to the 1st optical waveguide of the above at least.

[Claim 4] The optical modulator which it had the optical waveguide equipped with the photograph nick crystal two or more kinds of whose media come to form periodic structure, and the electrode which impresses electric field to the aforementioned optical waveguide, and the outgoing radiation end face of the aforementioned optical waveguide crossed in the direction in which the optical waveguide concerned is prolonged aslant, and is in contact with the medium which spreads light.

[Claim 5] The optical modulator according to claim 1 to 4 which is the medium by which at least one of the media of two or more kinds of light which makes the aforementioned periodic structure has the electro-optical effect.

[Claim 6] The optical modulator according to claim 1 to 5 whose length of one period of the periodic structure of the aforementioned photograph nick crystal is below the wavelength of the light for a modulation.

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[The technical field to which invention belongs] More specifically, this invention relates to the optical modulator which changes an electrical signal into a lightwave signal in lightwave signal transmission of an optical transmission system etc. about an optical

modulator.

[0002]

[Description of the Prior Art] Drawing 11 is a principle view explaining the conventional optical modulator (G. KGopalakrishnan et.al., JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL.12, No.10, Oct.1994, p1807). This optical modulator 110 is equipped with the optical waveguide formed in substrates, such as LiNbO<sub>3</sub> which has the electro-optical effect, and the electrode formed on the substrate impressing electric field to the optical waveguide. An optical waveguide is equipped with Y multiplexing section 104 for combining with one optical waveguide the light which has spread the Y tee 103, the two optical-waveguide sections 101,102 which branched by Y tee, and the two optical-waveguide sections sequentially from the travelling direction of light. An electrode consists of a signal electrode 105 and a grand electrode 107. It is used in order that a signal electrode 105 may impress electric field to the two above-mentioned optical-waveguide sections, and it combines with the electrical signal which spreads a signal electrode in electric field, and the grand electrode 107 is constituted so that a coplanar track may be formed. If an electrical signal is inputted into a signal electrode, according to an input electrical signal, electric field will be impressed to the optical-waveguide section. Since substrates, such as LiNbO<sub>3</sub> which forms the optical waveguide, have the electro-optical effect, the refractive-index change according to electric field generates them. Although drawing 11 shows the composition in which electric field are impressed only to one optical waveguide 102, since the electric field of a retrose are usually mutually impressed to the two above-mentioned optical-waveguide sections, refractive-index change takes place conversely mutually in the two waveguide sections. For this reason, in one waveguide section, since a refractive index increases and a refractive index decreases in the waveguide section of another side, the phase change of the light by electric-field impression is doubled. Consequently, if the light which spread two optical waveguides is multiplexed in Y multiplexing section, the change of optical intensity according to the phase relation of the light of the both sides which have bigger phase contrast will take place. Since the phase relation of the light of these both sides is brought about by the electrical signal, it can produce change of optical intensity with an electrical signal. The conventional optical modulator had changed the electrical signal into the lightwave signal by the above principles of operation.

[0003]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] However, in the above-mentioned conventional optical modulator, the propagation velocity of an electrical signal and a

lightwave signal differs, and, generally the propagation velocity of a lightwave signal is larger than the propagation velocity of an electrical signal. For this reason, the situation where the electrical signal of a RF is not faithfully convertible for a lightwave signal arises. Drawing 12 shows the wave of the lightwave signal modulated and outputted by the optical modulator, when the electrical signal of a RF is inputted. By drawing 12, for convenience, as shown in drawing 11, the optical-waveguide section was divided into the three sections, and the phase change of explanation received in each section is considered. Since a phase change is changed into an optical on-the-strength change by making the light which has spread the two optical-waveguide sections interfere as mentioned above, a phase change can be considered to be on-the-strength change of a lightwave signal. As shown in the left end portion of drawing 12, since the difference in the propagation distance of a lightwave signal and an electrical signal is small, in the section L1 near the signal input part of a lightwave signal, it receives the phase change of the same wave as the impressed electrical signal. In the section L2, as shown in a part for the center section of drawing 12, since the propagation velocity of light is larger than the propagation velocity of an electrical signal, the influence to which a phase is changed in the section L1 to the light of the range which shifted from the light of the range which carried out the phase change in time is done. Thus, if the section is divided and a phase change is repeated, all phase changes will serve as a phase change distribution which the level difference attached. That is, the phase change received even in the section L2 from the branched position turns into a phase change which the level difference attached. Furthermore, if it spreads to the section L3, as shown in the right end portion of drawing 12, the influence to which a phase is changed to the range further shifted rather than the range of the light influenced of the phase change in the section L1 and the section L2 will be done. For this reason, the distribution of the phase change in the time of spreading to the section L3 turns into a distribution which the level difference attached too. For this reason, the result which cannot change an electrical signal into a lightwave signal faithfully is produced. As mentioned above, in drawing 12, although the case of explanation where divided the section and a phase change was given in concentrated constant for convenience in each section was discussed, in the optical-waveguide section, a phase is changed in distributed constant in fact. For this reason, all the phase changes in the case of being actual serve as a wave like a mountain to which the standup/falling of not the wave to which the level difference was attached but the original electrical signal wave shift in a smooth curve. If the bit rate of an electrical signal becomes high, influence of the gently-sloping curve of the standup

section / falling section to the whole wave cannot be disregarded, but big property degradation will arise.

[0004] Thus, in the conventional optical modulator, since the propagation velocity of an electrical signal is smaller than the propagation velocity of a lightwave signal, if it is going to transform the electrical signal of a RF to a lightwave signal faithfully, the phase change per unit length must be enlarged and the amount of propagation delays to the lightwave signal of an electrical signal must be made small. However, in order to enlarge the phase change per unit length, it is necessary to enlarge voltage impressed to an electrode, and high speed and a high power drive circuit are needed. You have to avoid such a situation.

[0005] The proposal which forms an optical modulator in the photorefractive crystal which has periodic structure on the other hand is made (JP,11-330619,A). In this optical modulator, an optical-activity field is prepared and it has the structure which applies a modulation to the light which spreads this field. However, in these optical modulators, the composition of equipment becomes complicated and the case where processing is difficult arises -- there is the need of preparing an optical-activity field in a photorefractive crystal.

[0006] Then, this invention aims at offering the optical modulator which can output a lightwave signal faithful to the wave of an electrical signal according to brief structure.

[0007]

[Means for Solving the Problem] The optical modulator in the 1st aspect of affairs of this invention was equipped with the electrode which impresses electric field to one [ at least ] optical waveguide of a tee, two optical waveguides which branched from the tee, and two optical waveguides, and the multiplexing section which makes it multiplex the light which spread two optical waveguides, respectively, and two optical waveguides are equipped with the optical waveguide of the photorefractive crystal into which the medium of two or more kinds of light comes to form periodic structure (claim 1).

[0008] By this composition, when the material which has the electro-optical effect, an electrostrictive effect, etc. is included, the band curve showing the relation of a frequency-wave vector deforms into the inside of the medium which makes periodic structure by impressing electric field. Here, the band curve of the light in a photorefractive crystal points out the following thing. First, general wave propagation is explained. (a) If the wave vector of a wave approaches the predetermined boundary value (Brillouin-zone boundary) proportional to the inverse number of a period when a wave spreads the medium which has periodic structure, the wave which advances to an opposite direction by diffraction phenomena will become large, the wave and wave of

an opposite direction will interfere, and a standing wave will be formed.

(b) Near the Brillouin-zone boundary, a wave cannot have an energy value arbitrarily but can do the so-called forbidden band of energy. The energy difference equivalent to this forbidden band is called band gap. Since energy is proportional to frequency in a wave, it is the same as a forbidden band being made to frequency that the forbidden band of energy is made. It means that the wave of the frequency of the predetermined range from which this is equivalent to an energy gap with periodic structure cannot spread the periodic structure.

(c) In the range of the wave vector which generally is not in a Brillouin-zone boundary closely although the relation between the frequency of a wave and a wave vector is called dispersion relation, frequency and a wave-vector value become nonlinear near the Brillouin-zone boundary, although linear relation (straight line) is realized. Usually, when energy is the band curve (frequency-wave-vector relation) to which a low ground state belongs most, this nonlinear curve turns into a convex mountain type curve.

(d) If an electron is considered as a wave during the crystal which is the periodic structure itself, it can explain and predict the phenomenon in which the above-mentioned band theory is very good, and actual. For this reason, to the electron under crystal of a semiconductor etc. (electron), it is developed and established and the above-mentioned band theory serves as a fundamental theoretical support of the principle of operation of various semiconductors.

(e) Since light also has the character as a wave, \*\*\*\* of the above-mentioned band theory is applicable on form. Then, the crystal whose medium of light comes to form periodic structure is called photonic crystal, a phenomenon peculiar to light attracts attention, and research is advancing now. In the case of light, the inverse number of the inclination of the tangent in a wave-vector value with a band curve (frequency-wave-vector curve) is proportional to a refractive index. The inverse number of the inclination of the tangent near [ in a curve mountain type / near / which a band gap produces / the Brillouin-zone boundary ] a summit serves as a very big value. That is, the light of the wave-vector value near [ which produces a band gap ] the Brillouin zone will progress the inside of the medium of a very large refractive index. Since the propagation velocity of light becomes so small that a refractive index is large, the propagation velocity of the light which has a wave vector near the Brillouin-zone boundary becomes small. In addition, since a wave vector is proportional to the inverse number of the wavelength of the light at the time of progressing in the predetermined direction, it may call the thing of a wave vector wavelength.

[0009] In the optical modulator of the 1st aspect of affairs of the above-mentioned this

invention therefore, since the wavelength, then the refractive index of for example, near a Brillouin-zone boundary become very large, the propagation velocity of light becomes small and can make wavelength of the light which spreads an optical waveguide the same grade as the propagation velocity of an electrical signal. If electric field which are different in two waveguides are impressed under such a situation, the refractive index of the photorefractive crystal of two optical waveguides will change to an electrical signal faithfully. For this reason, the phase of the light after spreading two optical waveguides will be mutually different. If these two light is multiplexed, the synthetic wave according to phase contrast is formed, and phase contrast can be taken out as an optical on-the-strength change. It means that the phase contrast of two light had changed the electrical signal into the optical on-the-strength signal since it was made to be generated by impressing an electrical signal. And the output lightwave signal by which outgoing radiation is carried out becomes what was reflected as it was, without distorting the wave of an electrical signal, since optical propagation velocity is small. In addition, as long as the field strength impressed to both optical waveguides differs, the electric field also of the electric field or \*\*\*\* of the same sign as both optical waveguides are also good, and may apply the electric field of a retrose mutually. Moreover, you may apply electric field only to one optical waveguide.

[0010] In the optical modulator in the 1st aspect of affairs of the above-mentioned this invention, it is desirable that it is the optical waveguide which at least one side of two optical waveguides equips with the delay-line section for delaying a lightwave signal, for example (claim 2).

[0011] Since the propagation velocity of the direction which an electrical signal spreads becomes small, the light which passes along the delay-line section in this composition can double the propagation velocity of a lightwave signal, and the propagation velocity of an electrical signal by setting the degree of delay of this delay-line section as the suitable range. For this reason, the optical on-the-strength signal which has an output wave faithful to the wave of an electrical signal can be acquired now by applying the modulation by the electrical signal which has the propagation velocity suitable for the propagation velocity of light. It does not interfere, even if it impresses electric field to both optical waveguides also in this case. Moreover, the delay-line section may be prepared only in one side of an optical waveguide, and may be prepared in both.

[0012] The optical modulator in the 2nd aspect of affairs of this invention branches from a tee and a tee, and is equipped with the 1st optical waveguide equipped with the photorefractive crystal in which two or more kinds of media come to form periodic structure, the 2nd optical waveguide which has a different crystalline array from the

1st optical waveguide, and the electrode which impresses electric field to the 1st optical waveguide at least (claim 3).

[0013] A modulation is applied in the optical modulator of the 2nd aspect of affairs of this invention, without using interference of light. That is, the band gap of a photorefractive crystal is changed and it is made to contain the frequency  $\omega_1$  which spreads the 1st optical waveguide which was not contained in the forbidden band by applying electric field in a forbidden band by electric-field impression before electric-field impression. For this reason, in order for it to become impossible for the light of the frequency to spread one optical waveguide and to turn to the optical waveguide of another side, the luminous intensity which carries out outgoing radiation of the optical waveguide of another side becomes high. According to this composition, an electrode commits switching to the 1st optical waveguide by electric-field impression. After electric-field impression, light will spread the 2nd optical waveguide which does not have for example, periodic structure by big intensity. Since light turns to the way of the part and the 2nd optical waveguide it became impossible to spread the 1st optical waveguide, the luminous intensity which spreads the 2nd optical waveguide increases. Thus, the optical intensity which spreads the 2nd optical waveguide can be modulated by adjusting the luminous intensity which spreads the 1st optical waveguide. By this modulation mechanism, since interference etc. is not used, regardless of electron-transfer time etc., it is faithfully convertible for a lightwave signal with the electrical signal of a RF. As long as the above-mentioned situation is realized also in this case, you may impress electric field to both optical waveguides.

[0014] It had the optical waveguide equipped with the photorefractive crystal two or more kinds of whose media come to form periodic structure, and the electrode which impresses electric field to an optical waveguide, the outgoing radiation end face of an optical waveguide crossed in the direction in which the optical waveguide concerned is prolonged aslant, and the optical modulator in the 3rd aspect of affairs of this invention is in contact with the medium which spreads light (claim 4).

[0015] With this composition, the outgoing radiation angle at the time of carrying out outgoing radiation of the outgoing radiation end face can be changed by changing the refractive index of an optical waveguide by electric-field impression. In this case, when preparing the light sensing portion which receives the outgoing radiation light for outgoing radiation angle change of light, for example, luminous-intensity change can be further expanded through a position gap in the light sensing portion. This light modulation is faithfully convertible for an optical on-the-strength signal regardless of electron-transfer time etc. with the electrical signal of a RF.



[0016] In the optical modulator of the above-mentioned this invention, it is desirable that it is the medium by which at least one of the media of two or more kinds of light which makes periodic structure has the electro-optical effect, for example (claim 5).

[0017] By the above-mentioned composition, the band line of a photograph NIKUSU crystal can be changed a lot by impressing electric field, and the refractive index of a photograph NIKKUSU crystal can be certainly changed a lot by impression of smaller electric field.

[0018] In the optical modulator of the above-mentioned this invention, it is desirable for the length of one period of the periodic structure of a photograph nick crystal to be below the wavelength of the light for a modulation for example, (claim 6).

[0019] By this composition, an optical phenomena unique as a photograph NIKUSU crystal can be obtained more certainly. That is, it is possible by making the length of one period of periodic structure below into the wavelength of the light for a modulation to acquire more certainly effects, such as bigger dispersibility and low loss in a steep angle change of travelling direction.

[0020]

[Embodiments of the Invention] Next, the gestalt of operation of this invention is explained using a drawing.

(Gestalt 1 of operation) Drawing 1 is a \*\* type view explaining the optical modulator in the gestalt 1 of operation of this invention. The period of periodic structure is below the wavelength of the light of the object to which a modulation is applied, and at least one medium has the electro-optical effect among two or more media. The optical modulator 10 is equipped with Y multiplexing section 4 for multiplexing the light which has spread the Y tee 3, two optical waveguides 1 and 2 which have branched from Y tee, and these two optical waveguides sequentially from the input direction of light to one optical waveguide. Moreover, it has as an electrode the signal electrode 5 for impressing electric field to one side of the two optical waveguides, and the grand electrode 7 constituted so that it might combine with the electrical signal which spreads a signal electrode in electric field and a coplanar track might be formed.

[0021] Next, operation of this optical modulator is explained. First, the property of the periodic structure which consisted of media by which refractive indexes differ is explained. The periodic structure of having the period of the wavelength order of the light which consisted of media by which refractive indexes differ is called photograph nick crystal, and shows various unique properties (upper parts of rivers, application physics, volume [ 68th ] No. 12 (1999) p1335). Especially, high dispersibility can be raised as a property characteristic of a photograph nick crystal. Drawing 2 is drawing

having shown the dispersion relation of the photorefractive crystal to the light spread in the predetermined direction. If the light of the optical frequency  $\omega$  near the Brillouin-zone boundary is made to spread, since the inclination of a dispersion curve is small, it turns out that dispersibility with a high photorefractive crystal is shown [ near / the / the optical frequency ]. Here, distribution is the property in which the refractive indexes of a medium differ according to wavelength. As mentioned above, a refractive index is proportional to the inverse number of the inclination of the tangent of a band curve. For this reason, as a photorefractive crystal, a refractive index is a lot changeable according to the wavelength of the light which carries out incidence. That is, when the wavelength which performs light modulation is decided, by changing the band gap in a Brillouin-zone boundary, dispersibility can be changed and the refractive index to the light can be adjusted.

[0022] Next, the optical modulator using this photorefractive crystal is explained. Since at least one of the media which constitute a photorefractive crystal has the electro-optical effect, if an electrical signal is inputted into a signal electrode, the electric field according to the input electrical signal will be impressed to one optical-waveguide section, and the refractive-index change according to electric field generates it. The refractive index of the optical waveguide of another side changes and remains as it is. For this reason, if the light which spread two optical waveguides is multiplexed in Y multiplexing section 4, the synthetic wave according to the phase relation of both light will be formed of the interference effect. That is, the luminous-intensity change according to the input electrical signal arises. The optical modulator in the gestalt of this operation has changed the electrical signal into the lightwave signal by such the principle of operation.

[0023] As mentioned above, since the optical waveguide is constituted by the photorefractive crystal, by changing the band gap, it can change the form of a band curve and can change the refractive index of an optical waveguide. The propagation velocity of the light in an optical waveguide is mainly dependent on the refractive index of a medium, and if the refractive index of a medium is large, the propagation velocity of light will become small. Then, an optical modulator faithfully convertible [ with the electrical signal of a RF ] into a lightwave signal can be obtained by adjusting a refractive index appropriately so that the propagation velocity of an electrical signal and the propagation velocity of the lightwave signal in an optical waveguide may suit.

[0024] Drawing 3 is drawing which is outputted when the electrical signal of a RF is inputted to the optical modulator in the gestalt of this operation and in which showing the wave of the changed lightwave signal. In addition, also in drawing 3 , like the

output lightwave signal in the optical modulator shown in the conventional example, an optical waveguide is divided into the three sections for convenience, and the phase change received in each section is investigated. As mentioned above, since a phase change is changed into an optical on-the-strength change by making two light which has spread two optical waveguides interfere mutually, it can be caught with on-the-strength change of a lightwave signal. In drawing 3, in the section L1 near the lightwave signal input section, the section L2 of pars intermedia, and the last section L3, since the refractive index is appropriately adjusted so that the propagation velocity of an electrical signal and the propagation velocity of the lightwave signal in an optical waveguide may suit, a gap of an electrical signal and a lightwave signal does not arise in each section. For this reason, a lightwave signal receives the phase change of the same wave as the impressed electrical signal.

[0025] Thus, in the optical modulator of the gestalt of this operation, the band gap of a photograph nick crystal can be changed and a refractive index can be appropriately adjusted so that the propagation velocity of an electrical signal and the propagation velocity of the lightwave signal in an optical waveguide may suit. For this reason, the gap with an electrical signal and a lightwave signal does not arise in each section, but it can change into a lightwave signal faithfully also to the electrical signal of a RF. Moreover, since the gap with an electrical signal and a lightwave signal does not arise, an optical waveguide can be lengthened and the phase change per unit length of an optical waveguide can be made small. For this reason, voltage impressed to an electrode can be made small, and it can be made to hear enough a modulation and can drive now also in the small drive circuit of an output.

[0026] Drawing 4 is a \*\* type view explaining another formation of the gestalt 1 of operation of this invention. In drawing 4, signal electrodes 5 and 15 are formed so that electric field may be impressed to two optical waveguides 1 and 2. For this reason, if it arranges for example, so that electric field may be mutually impressed to a retrose to two optical waveguides 1 and 2, since change of a refractive index will arise in a retrose, the difference of the phase of the light which spread two optical waveguides is doubled compared with the case where electric field are impressed to one optical waveguide. For this reason, it can face applying a modulation, without the gap with an electrical signal and a lightwave signal arising, an optical waveguide can be further lengthened as compared with the gestalt 1 of operation, and the phase change per unit length of an optical waveguide can be made still smaller. In addition, both may be pluses as long as the electric field impressed to both optical waveguides are different.

[0027] (Gestalt 2 of operation) Drawing 5 is a \*\* type view explaining the optical

modulator in the gestalt 2 of operation of this invention. The optical modulator in the gestalt of this operation is formed in the photograph nick crystal into which two or more media by which refractive indexes differ are making periodic structure. The period of the periodic structure in a photograph nick crystal is below the wavelength of the light of the object to which light modulation is applied, and at least one medium which constitutes the periodic structure has the electro-optical effect.

[0028] The optical modulator 10 is equipped with Y multiplexing section 4 for multiplexing the light which has spread the Y tee 3, two optical waveguides 1 and 2 which have branched from Y tee, and these two optical waveguides sequentially from the input direction of light to one optical waveguide. Moreover, it has as an electrode the signal electrode 5 for impressing electric field to one side of the two optical waveguides, and the grand electrode 7 constituted so that it might combine with the electrical signal which spreads a signal electrode in electric field and a coplanar track might be formed. It is the big feature in the gestalt of this operation that one [2] of two optical waveguides 1 and 2 is equipped with the delay-line section 12 for delaying a lightwave signal.

[0029] Next, operation is explained. First, the property of the optical waveguide formed of the periodic structure which consists of a medium by which refractive indexes differ is explained. The optical waveguide constituted by the photograph nick crystal which consisted of media by which refractive indexes differ, and which consists of periodic structure of the wavelength order of light can spread light without loss also to steep deflection as shown in the reference of previous upper parts of rivers. Since at least one of the media which constitute a photograph nick crystal has the electro-optical effect, if an electrical signal is inputted into a signal electrode, the electric field according to the input electrical signal will be impressed to an optical waveguide, and the refractive-index change according to electric field will produce it.

[0030] The optical waveguide 2 of the way which impresses electric field has the delay-line section 12. The enlarged view of the delay-line section is shown in drawing 6. Since it is formed as the photograph nick crystal like [ this optical waveguide ] the optical waveguide which does not have the delay-line section, light can also spread a part for the steep bend section of the delay-line section 12 without loss as mentioned above. By making it multiplex the light which spread the optical waveguide 1 which does not contain the delay-line section, and the light which spread the optical waveguide 2 containing the delay-line section 12, interference is produced and a phase change can be changed into on-the-strength change. At this time, it is faithfully convertible for a lightwave signal by preparing the delay-line section and adjusting the

propagation time with the electrical signal of a RF so that the propagation velocity of an electrical signal and the propagation velocity of the lightwave signal which spreads an optical waveguide may suit.

[0031] The wave of the changed lightwave signal outputted when the electrical signal of a RF is inputted can be divided into the three sections for convenience like the output wave in the form 1 of operation of drawing 3 , and can be considered. Also in the form 2 of this operation, like drawing 3 , the gap with an electrical signal and a lightwave signal does not arise, but can consider as the phase change of the same wave as the impressed electrical signal in each section.

[0032] Thus, at the optical modulator of the gestalt of this operation, the propagation time is appropriately adjusted in the optical delay line so that the propagation velocity of an electrical signal and the propagation velocity of the lightwave signal in an optical waveguide may suit. For this reason, the gap with an electrical signal and a lightwave signal does not arise in each section, but it can change into a lightwave signal faithfully also to the electrical signal of a RF. Moreover, since the gap with an electrical signal and a lightwave signal does not arise, an optical waveguide can be lengthened and the phase change per unit length of an optical waveguide can be made small. For this reason, voltage impressed to an electrode can be made small, and it can be made to hear enough a modulation and can drive now also in the small drive circuit of an output.

[0033] (Form 3 of operation) Drawing 7 is a \*\* type view explaining the optical modulator in the form 3 of operation of this invention. The optical modulator in the form of this operation is equipped with the 1st optical waveguide 1 to which two or more media by which the refractive indexes containing the medium which has at least one kind of electro-optical effect differ made periodic structure, and the 2nd optical waveguide 2 which has a different crystalline array 19 from the 1st optical waveguide. A different crystalline array from the 1st optical waveguide says the crystalline array which broke down the periodic structure of the 1st optical waveguide and introduced the defect. Moreover, as shown in drawing 7 , this optical modulator impressed electric field to the optical waveguide 1, and is equipped with the electrode to which the band gap formed of periodic structure is changed. The period of this periodic structure is below the wavelength of the light of the object to which a modulation is applied. In addition, it combined with the signal electrode 5 for impressing electric field to an optical waveguide, and the electrical signal which spreads a signal electrode in electric field, and the electrode is equipped with the grand electrode 7 constituted so that a coplanar track might be formed. As long as a signal electrode 5 can apply electric field

to an optical waveguide 1, it may require electric field for an optical waveguide 2.

[0034] Drawing 8 is drawing showing the dispersion relation of a photograph nick crystal. If the band gap of a photograph nick crystal is changeable by impressing electric field as shown in this drawing, let light of the angular frequency  $\omega_1$  which is not in a forbidden band be the light of the forbidden band in a band gap by impressing electric field before electric-field impression. For this reason, it becomes impossible to spread the light which had spread the 1st optical waveguide 1 which branched from the Y tee 3 by impressing electric field, and it turns to the 2nd optical waveguide.

[0035] If the defective way which does not form for example, periodic structure in a photograph nick crystal is prepared as the 2nd optical waveguide, the light to which surroundings intensity increased [ the light to which propagation of an optical waveguide 1 was forbidden ] on the defective way will spread the 2nd optical waveguide. Therefore, before impressing electric field, after electric field are impressed to having been small as for the luminous intensity which had spread the defective way which is the 2nd optical waveguide, the optical intensity outputted from the output port of a defective way becomes large.

[0036] Thus, since the waveguide conditions of the optical waveguide which was formed of the photograph nick crystal and was are changed using electric field, regardless of electron-transfer time etc., a lightwave signal is faithfully convertible with the electrical signal of a RF.

[0037] In addition, although drawing 7 showed the linear example as an optical waveguide, as shown in drawing 9 , when a deflection waveguide is introduced and the input section and the output section of an optical waveguide offset, bigger optical output change, i.e., efficient light modulation, can be performed.

[0038] (Form 4 of operation) Drawing 10 is drawing explaining the optical modulator in the form 4 of operation of this invention. The optical modulator in the form of this operation is equipped with the optical waveguide 1 in which two or more media by which refractive indexes differ made and formed periodic structure, and the electrodes 5 and 7 to which the band gap which impresses electric field to this optical waveguide, and originates in periodic structure is changed. The length of the period of periodic structure is below the wavelength of the light for a modulation. Outgoing radiation end-face 10a of an optical waveguide inclines aslant to the direction where an optical waveguide is prolonged. An outgoing radiation end face must not be perpendicular to the direction where an optical waveguide is prolonged here. As explained previously, the photograph nick crystal which has the periodic structure of the wavelength order of

the light which consists of media by which refractive indexes differ has high dispersibility. By changing the band gap of a photorefractive crystal, this dispersibility is clearly changeable. That is, the refractive index of a photorefractive crystal is changeable by changing a band gap with applied voltage.

[0039] Next, this optical modulator is explained. Drawing 10 The outgoing radiation end face of an optical waveguide leans aslant to the direction where an optical waveguide is prolonged so that it may be shown. For this reason, if a band gap is changed with applied voltage and the refractive index of a photorefractive crystal is changed, an outgoing radiation angle will change. When the refractive index of the medium by which the refractive index of an optical waveguide 1 touches the outgoing radiation end-face 10a by  $n_1$  is  $n_2$ , the relation of  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$  is realized. Therefore,  $\theta_2$  is more nearly changeable than changing  $n_1$ , without changing  $\theta_1$  and  $n_2$ . In addition, it is the angle of the normal of  $\theta_1$  and  $\theta_2$  outgoing-radiation end-face 10a, and light to make. Drawing 10 The light after outgoing radiation passes along a condenser lens 21, and if it constitutes so that light may be received by the light-receiving system of an optical fiber 22, the optical output change also with a slight big angle change will arise, so that it may be shown. Consequently, efficient light modulation can be performed.

[0040] Thus, since the waveguide conditions of the optical waveguide formed of the photorefractive crystal are changed using electric field, they can obtain an optical modulator faithfully convertible [ with the electrical signal of a RF ] into a lightwave signal regardless of electron-transfer time etc. Moreover, with optical system, since outgoing radiation angle change of light is expandable to a position gap of the image formation point to an optical fiber and a required angle change, i.e., refractive-index change, may be small, it can drive in the small drive circuit of driver voltage.

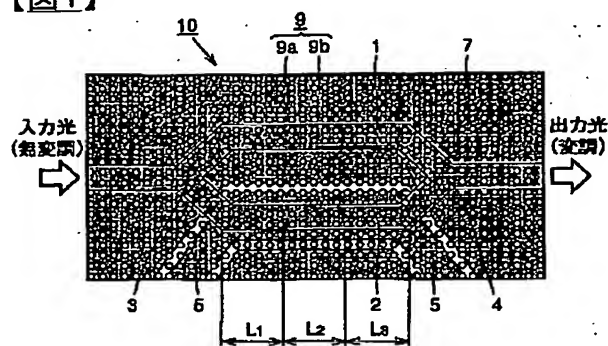
[0041] In the above, although the form of operation of this invention was explained, the form of operation of this invention indicated above is instantiation to the last, and the range of this invention is not limited to the form of implementation of these invention. The range of this invention is shown by the publication of a claim, and includes the publication of a claim, an equal meaning, and all change in within the limits further.

[0042]

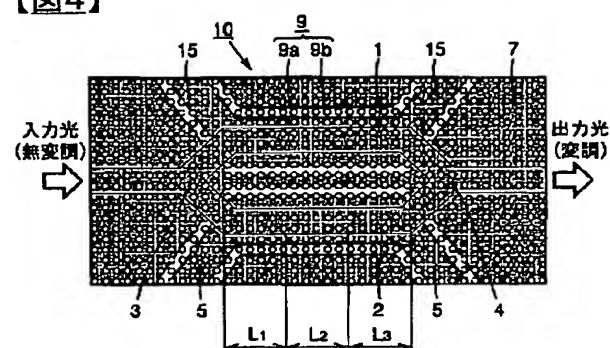
[Effect of the Invention] By using the optical modulator of this invention, it becomes possible to change an electrical signal into an optical on-the-strength signal faithful to the wave of the electrical signal.

## 図面

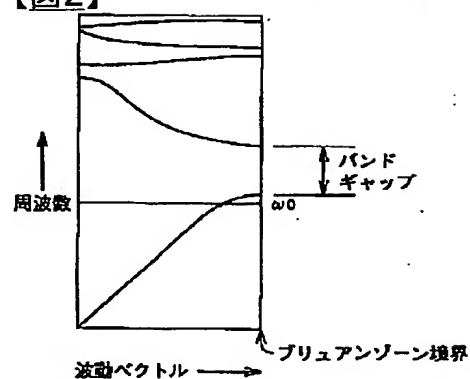
【図1】



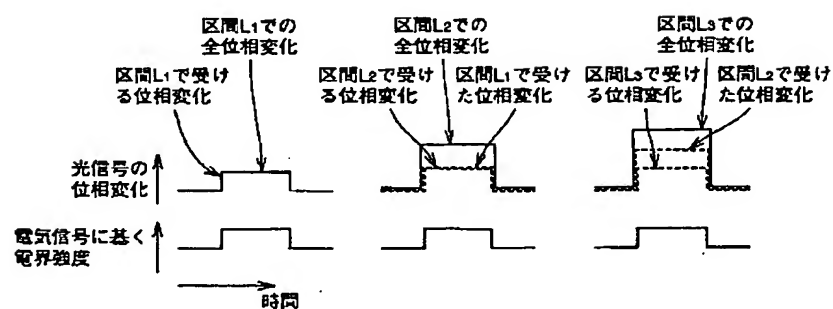
【図4】



【図2】

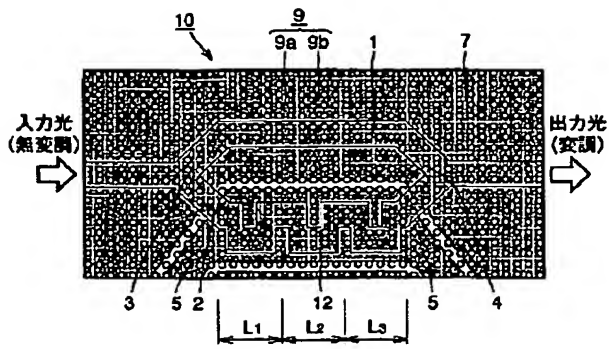


【図3】

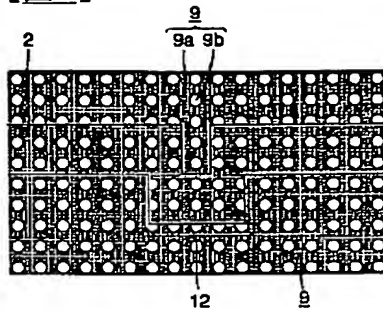


【図5】

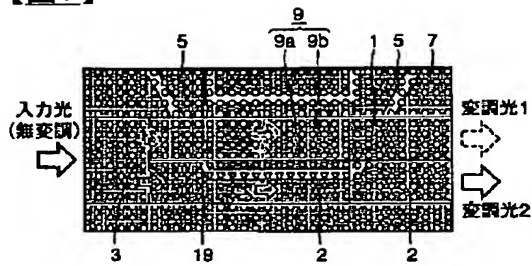




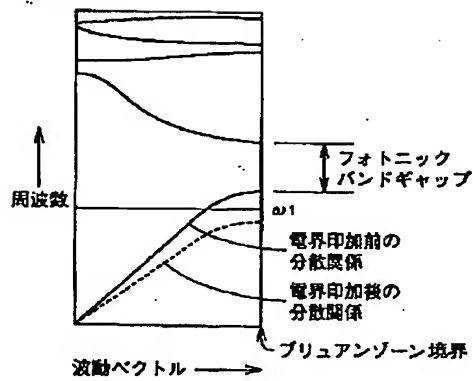
【図6】



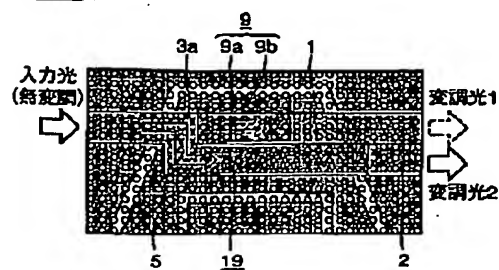
【図7】



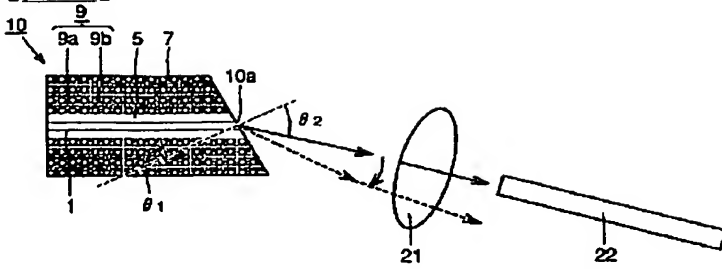
【図8】



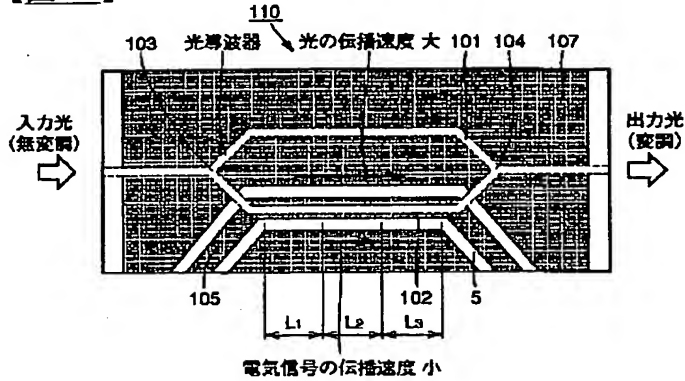
【図9】



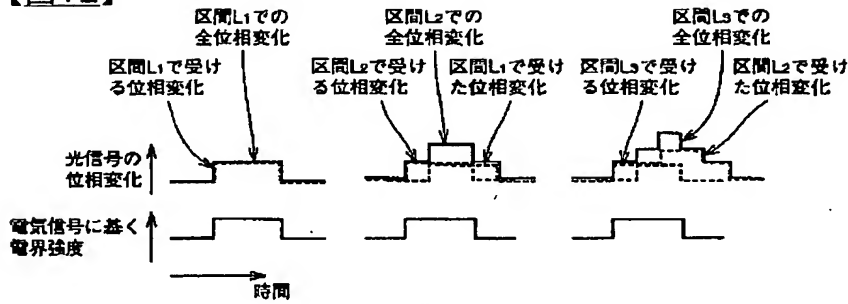
【図10】



【図11】



【図12】



(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-196296

(P2002-196296A)

(43)公開日 平成14年7月12日(2002.7.12)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード*(参考)
G 0 2 F	1/035	G 0 2 F 1/035	2 H 0 4 7
G 0 2 B	6/12	G 0 2 B 6/12	J 2 H 0 7 9
			N
			Z

審査請求 未請求 請求項の数6 O L (全 9 頁)

(21)出願番号 特願2000-392456(P2000-392456)

(22)出願日 平成12年12月25日(2000.12.25)

(71)出願人 000006013

三菱電機株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号

(72)発明者 金子 進一

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三

菱電機株式会社内

(74)代理人 100064746

弁理士 深見 久郎 (外4名)

Fターム(参考) 2H047 KA00 KA04 LA12 NA02 RA08

2H079 AA02 AA12 BA01 CA04 DA01

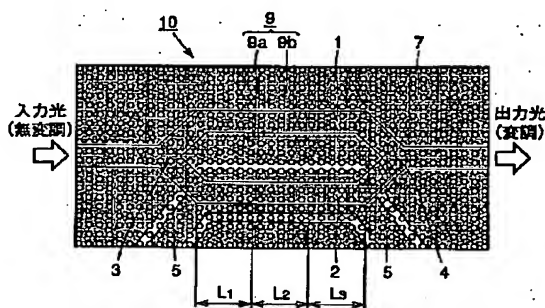
EA05 EB05 HA15

(54)【発明の名称】 光変調器

(57)【要約】

【課題】 簡明な構造により、電気信号の波形に忠実な光信号を出力することができる光変調器を提供する。

【解決手段】 分岐部3と、分岐部から分岐した2つの光導波路1、2と、2つの光導波路の少なくとも一方の光導波路に電界を印加する電極5、7と、2つの光導波路をそれぞれ伝播した光を合波させる合波部4とを備え、2つの光導波路が、2種類以上の光の媒質が周期構造を形成してなるフォトニック結晶9の光導波路を備えている。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 分岐部と、

前記分岐部から分岐した2つの光導波路と、

前記2つの光導波路の少なくとも一方の光導波路に電界を印加する電極と、

前記2つの光導波路をそれぞれ伝播した光を合波させる合波部とを備え、

前記2つの光導波路が、2種類以上の光の媒質が周期構造を形成してなるフォトニック結晶の光導波路を備えている、光変調器。

【請求項2】 前記2つの光導波路の少なくとも一方が、光信号を遅延させるための遅延線部を備える光導波路である、請求項1に記載の光変調器。

【請求項3】 分岐部と、

前記分岐部から分岐し、2種類以上の媒質が周期構造を形成してなるフォトニック結晶を備える第1の光導波路と、

前記第1の光導波路と異なる結晶配列を有する第2の光導波路と、

少なくとも前記第1の光導波路に電界を印加する電極とを備える、光変調器。

【請求項4】 2種類以上の媒質が周期構造を形成してなるフォトニック結晶を備える光導波路と、

前記光導波路に電界を印加する電極とを備え、

前記光導波路の出射端面が当該光導波路の延びる方向に斜めに交差して、光を伝播する媒質に接している、光変調器。

【請求項5】 前記周期構造をなす2種類以上の光の媒質のうち、少なくとも1つが電気光学効果を有する媒質である、請求項1～4のいずれかに記載の光変調器。

【請求項6】 前記フォトニック結晶の周期構造の1周期の長さが変調対象の光の波長以下である、請求項1～5のいずれかに記載の光変調器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、光変調器に関し、より具体的には、光通信システム等の光信号送信において、電気信号を光信号に変換する光変調器に関する。

【0002】

【従来の技術】図11は、従来の光変調器を説明する原理図である(G.K.Gopalakrishnan et.al., JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL.12, No.10, Oct.1994, p1807)。この光変調器110は、電気光学効果を有するLiNbO<sub>3</sub>などの基板に形成された光導波路と、その光導波路に電界を印加するに基板上に形成された電極とを備えている。光導波路は、光の進行方向から順に、Y分岐部103、Y分岐部によって分岐された2つの光導波路部101、102、および2つの光導波路部を伝播してきた光を1つの光導波路に結合するためのY合波部104を

備える。電極は、信号電極105とグランド電極107とから構成される。信号電極105は、上記の2つの光導波路部に電界を印加するために用いられ、グランド電極107は、信号電極を伝播してくる電気信号と電界的に結合し、コプレーナ線路を形成するように構成されている。信号電極に電気信号を入力すると、入力電気信号に応じて光導波路部に電界が印加される。光導波路を形成しているLiNbO<sub>3</sub>などの基板は電気光学効果を有しているため、電界に応じた屈折率変化が発生する。図11では、一方の光導波路102にのみ電界が印加される構成を示しているが、通常は、上記の2つの光導波路部に互いに逆向きの電界が印加されるので、屈折率変化は、2つの導波路部で互いに逆に起こる。このため、一方の導波路部では屈折率は増大し、他方の導波路部では屈折率は減少するので、電界印加による光の位相変化が倍増される。この結果、2つの光導波路を伝播した光をY合波部にて合波すると、より大きな位相差を有する双方の光の位相関係に応じた光強度の変化が起こる。この双方の光の位相関係は、電気信号によってもたらされるので、電気信号によって光強度の変化を生じさせることができる。従来の光変調器は、上記のような動作原理により電気信号を光信号に変換していた。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上述の従来の光変調器では、電気信号と光信号との伝播速度が異なり、一般に、光信号の伝播速度のほうが電気信号の伝播速度よりも大きい。このため、高周波の電気信号を忠実に光信号に変換することができない事態が生じる。図12は、高周波の電気信号を入力した場合に、光変調器によって変調され出力される光信号の波形を示す。図12では、説明の便宜上、図11に示すように、光導波路部を3つの区間に分けて、それぞれの区間で受ける位相変化を考察している。位相変化は、上述のように、2つの光導波路部を伝播してきた光を干渉させることにより光強度変化に変換されるので、位相変化は光信号の強度変化と考えることができる。図12の左端部分に示すように、光信号の信号入力部に近い区間L1では、光信号と電気信号との伝播距離の違いは小さいため、印加した電気信号と同じ波形の位相変化を受ける。区間L2においては、図12の中央部分に示すように、光の伝播速度が電気信号の伝播速度よりも大きいため、区間L1で位相変化した範囲の光と時間的にずれた範囲の光に対して位相を変化させる影響を及ぼす。このように、区間を分けて位相変化を積み重ねると、全位相変化は段差がついた位相変化分布となる。すなわち、分岐した位置から区間L2までに受ける位相変化は、段差がついた位相変化となる。さらに、区間L3まで伝播すると、図12の右端部分に示すように、区間L1および区間L2において位相変化の影響を受けた光の範囲よりもさらにずれた範囲に対して位相を変化させる影響を及ぼす。このため、

区間L3まで伝播した時点での位相変化の分布は、やはり段差がついた分布となる。このため、電気信号を光信号へと忠実に変換することができない結果を生じる。上述のように、図12では、説明の便宜上、区間を区切って各区間で集中定数的に位相変化を与える場合を論じたが、実際には光導波路部では分布定数的に位相を変化させる。このため、実際の場合の全位相変化は、段差の付いた波形ではなく、元の電気信号波形の立上り/立下りが滑らかな曲線で移行する山のような波形となる。電気信号のビットレートが高くなると、全体の波形に対する立上り部/立下り部のなだらかな曲線の影響を無視できず、大きな特性劣化が生じる。

【0004】このように、従来の光変調器では、電気信号の伝播速度が光信号の伝播速度より小さいため、高周波の電気信号を忠実に光信号に変換させようとすると、単位長さあたりの位相変化を大きくし、電気信号の光信号に対する伝播遅延量を小さくしなければならない。しかしながら、単位長さあたりの位相変化を大きくするためには、電極に印加する電圧を大きくする必要があり、高速かつ大出力の駆動回路が必要となる。このような状況は避けなければならない。

【0005】一方、周期構造を有するフォトニック結晶に光変調器を形成する提案がなされている（特開平11-330619号公報）。この光変調器では、光学活性領域を設け、この領域を伝播する光に変調をかける構造を有している。しかしながら、これらの光変調器では光学活性領域をフォトニック結晶内に設ける必要があるなど、装置の構成が複雑になり加工が難しい場合が生じる。

【0006】そこで、本発明は簡明な構造により、電気信号の波形に忠実な光信号を出力することができる光変調器を提供することを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】本発明の第1の局面における光変調器は、分岐部と、分岐部から分岐した2つの光導波路と、2つの光導波路の少なくとも一方の光導波路に電界を印加する電極と、2つの光導波路をそれぞれ伝播した光を合波させる合波部とを備え、2つの光導波路が、2種類以上の光の媒質が周期構造を形成してなるフォトニック結晶の光導波路を備えている（請求項1）。

【0008】この構成により、周期構造をなす媒質のうち、たとえば、電気光学効果や電歪効果等を有する材料を含む場合には、電界を印加することにより周波数-波動ベクトルの関係を表わすバンド曲線が変形する。ここで、フォトニック結晶における光のバンド曲線とは、つぎのものを指す。まず、一般的な波の伝播について説明する。

（a）周期構造を有する媒質を波が伝播するとき、波の波動ベクトルが周期の逆数に比例する所定の境界値（ブリュアンゾーン境界）に近づくと、回折現象により逆方

向に進行する波が大きくなり、その波と逆方向の波とが干渉して定在波を形成する。

（b）ブリュアンゾーン境界の近くでは、波はエネルギー値を任意に持つことはできず、いわゆるエネルギーの禁止帯ができる。この禁止帯に相当するエネルギー差をバンドギャップという。波においてエネルギーは周波数に比例するので、エネルギーの禁止帯ができることは、周波数に禁止帯ができることと同じである。これは、周期構造では、エネルギーギャップに相当する所定範囲の周波数の波はその周期構造を伝播することができないことを意味する。

（c）一般に、波の周波数と波動ベクトルとの関係を分散関係というが、ブリュアンゾーン境界に近くない波動ベクトルの範囲では、周波数と波動ベクトル値とは線形関係（直線）が成り立つが、ブリュアンゾーン境界近くでは、非線形となる。通常、エネルギーが最も低い基底状態が属するバンド曲線（周波数-波動ベクトル関係）の場合、この非線形の曲線は上に凸の山型の曲線になる。

（d）電子は周期構造そのものである結晶中において波として考えると、上記バンド理論が非常によく実際の現象を説明し予言することができる。このため、半導体等の結晶中の電子（エレクトロン）に対して、上記のバンド理論は発展され確立され、各種半導体の動作原理の基本的な理論的支柱となっている。

（e）光も波としての性格を有するので、上記バンド理論の描像を形式上あてはめることができる。そこで、光の媒質が周期構造を形成してなる結晶をフォトニック結晶と呼んで、光に特有な現象が注目を集め、現在、研究が進行中である。光の場合、バンド曲線（周波数-波動ベクトル曲線）のある波動ベクトル値における接線の勾配の逆数は、屈折率に比例する。バンドギャップが生じるブリュアンゾーン境界近くの山型の曲線における頂上付近の接線の勾配の逆数は、非常に大きな値となる。すなわち、バンドギャップを生じるブリュアンゾーン近くの波動ベクトル値の光は、非常に大きい屈折率の媒質中を進むことになる。光の伝播速度は屈折率が大きいほど小さくなるので、ブリュアンゾーン境界近くの波動ベクトルを有する光の伝播速度は小さくなる。なお、波動ベクトルは、所定の方向に進む際のその光の波長の逆数に比例するので、波動ベクトルのことを波長と呼ぶことがある。

【0009】上記本発明の第1の局面の光変調器では、したがって、光導波路を伝播する光の波長を、たとえば、ブリュアンゾーン境界付近相当の波長とすれば、屈折率は非常に大きくなるので、光の伝播速度は小さくなり、電気信号の伝播速度と同じ程度にすることができる。このような状況下で、2つの導波路に異なる電界を印加すると、2つの光導波路のフォトニック結晶の屈折率が電気信号に忠実に変化する。このため、2つの光導波路を伝播した後の光の位相は、互いに相違することに

なる。これら2つの光を合波すれば位相差に応じた合成波が形成され、位相差を光強度変化として取り出すことができる。2つの光の位相差は、電気信号を印加することにより生じさせたのであるから、電気信号を光強度信号に変換したことになる。しかも、出射される出力光信号は、光伝播速度が小さいために電気信号の波形を歪めることなくそのまま反映したものとなる。なお、電界は両方の光導波路に印加する電界の強さが異なるかぎり、両方の光導波路に同じ符号の電界かけてもよいし、互いに逆向きの電界をかけてもよい。また、一方の光導波路にのみ電界をかけてもよい。

【0010】上記本発明の第1の局面における光変調器では、たとえば、2つの光導波路の少なくとも一方が、光信号を遅延させるための遅延線部を備える光導波路であることが望ましい（請求項2）。

【0011】この構成において遅延線部を通る光は電気信号が伝播する方向の伝播速度が小さくなるので、この遅延線部の遅延度を適切な範囲に設定することにより、光信号の伝播速度と電気信号の伝播速度とを合わせることができる。このため、光の伝播速度に合った伝播速度を有する電気信号による変調をかけることにより、電気信号の波形に忠実な出力波形を有する光強度信号を得ることができるようになる。この場合も、電界は両方の光導波路に印加しても差し支えない。また、遅延線部は、光導波路の一方にのみ設けてもよいし、両方に設けてもよい。

【0012】本発明の第2の局面における光変調器は、分岐部と、分岐部から分岐し、2種類以上の媒質が周期構造を形成してなるフォトニック結晶を備える第1の光導波路と、第1の光導波路と異なる結晶配列を有する第2の光導波路と、少なくとも第1の光導波路に電界を印加する電極とを備える（請求項3）。

【0013】本発明の第2の局面の光変調器では、光の干渉を用いることなく変調をかける。すなわち、電界をかけることによりフォトニック結晶のバンドギャップを変化させて、電界印加前は禁止帯に含まれていなかった第1の光導波路を伝播する周波数 $\omega_1$ を電界印加により禁止帯に含まれるようにする。このため、一方の光導波路をその周波数の光が伝播できなくなり、他方の光導波路にまわるため、他方の光導波路を出射する光の強度が高くなる。この構成によれば、電極は、電界印加による第1の光導波路に対するスイッチングの働きをする。電界印加後は、たとえば周期構造を有しない第2の光導波路を光が大きな強度で伝播することになる。光が第1の光導波路を伝播できなくなった分、第2の光導波路のほうに回るので、第2の光導波路を伝播する光の強度が増大する。このように、第1の光導波路を伝播する光の強度を調節することにより、第2の光導波路を伝播する光強度を変調させることができる。この変調機構では、干渉等を用いていないので、電子の移動時間等に関係なく

高周波の電気信号でも忠実に光信号に変換することができる。この場合も、上記の状況が実現されるかぎり、電界は両方の光導波路に印加してかまわない。

【0014】本発明の第3の局面における光変調器は、2種類以上の媒質が周期構造を形成してなるフォトニック結晶を備える光導波路と、光導波路に電界を印加する電極とを備え、光導波路の出射端面が当該光導波路の延びる方向に斜めに交差して、光を伝播する媒質に接している（請求項4）。

10 【0015】この構成では、電界印加により光導波路の屈折率を変えることにより、出射端面を出射する際の出射角を変化させることができる。この場合、光の出射角変化を、たとえばその出射光を受ける受光部を設ける場合には、光の強度変化をその受光部への位置ずれを介してさらに拡大することができる。この光変調は電子の移動時間等に関係なく、高周波の電気信号でも忠実に光強度信号に変換することができる。

20 【0016】上記本発明の光変調器では、たとえば、周期構造をなす2種類以上の光の媒質のうち、少なくとも1つが電気光学効果を有する媒質であることが望ましい（請求項5）。

【0017】上記の構成により、電界を印加することにより、より大きくフォトニクス結晶のバンド線を変化させることができ、より小さい電界の印加により、確実にフォトニクス結晶の屈折率をより大きく変化させることができる。

【0018】上記本発明の光変調器では、たとえば、フォトニック結晶の周期構造の1周期の長さが変調対象の光の波長以下であることが望ましい（請求項6）。

30 【0019】この構成により、フォトニクス結晶として特異な光学現象をより確実に得ることができる。すなわち、周期構造の1周期の長さを変調対象の光の波長以下とすることにより、より大きな分散性や進行方向の急峻な角度変化における低損失等の効果をより確実に得ることが可能である。

【0020】

【発明の実施の形態】次に図面を用いて本発明の実施の形態について説明する。

（実施の形態1）図1は、本発明の実施の形態1における光変調器を説明する模式図である。周期構造の周期は、変調をかける対象の光の波長以下であり、また、複数の媒質のうち少なくとも1つの媒質は電気光学効果を有している。光変調器10は、光の入力方向から順に、Y分岐部3と、Y分岐部から分岐している2つの光導波路1、2と、この2つの光導波路を伝播してきた光を1つの光導波路に合波するためのY合波部4とを備えている。また、電極として、2つの光導波路のうちの一方に電界を印加するための信号電極5と、信号電極を伝播する電気信号と電界的に結合し、コプレーナ線路を形成するように構成されたグランド電極7とを備えている。

【0021】次に、この光変調器の動作について説明する。まず、屈折率の異なる媒質から構成された周期構造の性質について説明する。屈折率の異なる媒質から構成された光の波長オーダーの周期を有する周期構造は、フォトニック結晶と呼ばれ、様々な特異な性質を示す（川上ら、応用物理、第68巻 第12号(1999)p1335）。なかでも、フォトニック結晶に特徴的な性質として、高い分散性をあげることができる。図2は、所定方向に伝播する光に対するフォトニック結晶の分散関係を示した図である。ブリュアンゾーン境界近傍の光周波数 $\omega_0$ の光を伝播させると、分散曲線の傾きが小さくなっているため、その光周波数近傍において、フォトニック結晶が高い分散性を示すことが分る。ここで、分散とは、媒質の屈折率が波長に応じて異なるという性質である。上述したように、屈折率はバンド曲線の接線の勾配の逆数に比例する。このため、フォトニック結晶では、入射する光の波長に応じて屈折率を大きく変えることができる。すなわち、光変調を行う波長が決まっている場合には、ブリュアンゾーン境界におけるバンドギャップを変えることにより、分散性を変え、その光に対する屈折率を調整することができる。

【0022】次に、このフォトニック結晶を用いた光変調器について説明する。フォトニック結晶を構成する媒質のうち少なくとも1つは、電気光学効果を有するため、信号電極に電気信号を入力すると入力電気信号に応じた電界が一方の光導波路部に印加され、電界に応じた屈折率変化が発生する。他方の光導波路の屈折率は変化せずそのままである。このため、2つの光導波路を伝播した光を、Y合波部4で合波すると、干渉効果により双方の光の位相関係に応じた合成波が形成される。すなわち、入力電気信号に応じた光の強度変化が生じる。本実施の形態における光変調器は、このような動作原理により電気信号を光信号に変換している。

【0023】上述したように、光導波路はフォトニック結晶によって構成されているため、そのバンドギャップを変えることによりバンド曲線の形を変え、光導波路の屈折率を変えることができる。光導波路における光の伝播速度は、主に媒質の屈折率に依存しており、媒質の屈折率が大きいと光の伝播速度は小さくなる。そこで、電気信号の伝播速度と光導波路における光信号の伝播速度が合うように適切に屈折率を調整することにより、高周波の電気信号でも忠実に光信号に変換できる光変調器を得ることができる。

【0024】図3は、本実施の形態における光変調器に対して高周波の電気信号を入力した場合に出力される、変換された光信号の波形を示す図である。なお、図3においても、従来例において示した光変調器における出力光信号と同様に、便宜的に光導波路を3つの区間に分けて、それぞれの区間で受ける位相変化を調べる。上述のように、位相変化は、2つの光導波路を伝播してきた2

つの光を互いに干渉させることにより光強度変化に変換されるため、光信号の強度変化と捉えることができる。図3において、光信号入力部に近い区間L1、中間部の区間L2、最後の区間L3においても、電気信号の伝播速度と、光導波路における光信号の伝播速度が合うように適切に屈折率を調整しているため、各区間で電気信号と光信号のずれが生じない。このため、光信号は、印加した電気信号と同じ波形の位相変化を受ける。

【0025】このように、本実施の形態の光変調器では、電気信号の伝播速度と、光導波路における光信号の伝播速度が合うようにフォトニック結晶のバンドギャップを変えて適切に屈折率を調整することができる。このため、各区間で電気信号と光信号とのずれが生じず、高周波の電気信号に対しても忠実に光信号に変換することができる。また、電気信号と光信号とのずれが生じないため、光導波路を長くして、光導波路の単位長さ当りの位相変化を小さくすることができる。このため、電極に印加する電圧を小さくすることができ、出力の小さい駆動回路でも十分変調をきかせて駆動することができるようになる。

【0026】図4は、本発明の実施の形態1の別の形成を説明する模式図である。図4において、信号電極5、15は、2つの光導波路1、2に電界を印加するように設けられている。このため、たとえば、2つの光導波路1、2に対して互いに逆向きに電界を印加するように配置すると、屈折率の変化が逆向きに生じるため、2つの光導波路を伝播した光の位相の差は、1つの光導波路に電界を印加した場合に比べて倍増する。このため、電気信号と光信号とのずれが生じることなく変調をかけるに際して、実施の形態1に比較して光導波路をさらに長くして、光導波路の単位長さ当りの位相変化をさらに小さくすることができる。なお、両方の光導波路に印加する電界は、相違するかぎり両方ともプラスであってもよい。

【0027】（実施の形態2）図5は、本発明の実施の形態2における光変調器を説明する模式図である。本実施の形態における光変調器は、屈折率の異なる複数の媒質が周期構造をなしているフォトニック結晶内に形成されている。フォトニック結晶における周期構造の周期は、光変調をかける対象の光の波長以下であり、その周期構造を構成する少なくとも1つの媒質は、電気光学効果を有している。

【0028】光変調器10は、光の入力方向から順に、Y分岐部3と、Y分岐部から分岐している2つの光導波路1、2と、この2つの光導波路を伝播してきた光を1つの光導波路に合波するためのY合波部4とを備えている。また、電極として、2つの光導波路のうちの一方に電界を印加するための信号電極5と、信号電極を伝播する電気信号と電界的に結合し、コプレーナ線路を形成するように構成されたグランド電極7とを備えている。2



つの光導波路1、2のうちの1つの光導波路2が、光信号を遅延させるための遅延線部12を備えていることが、本実施の形態における大きな特徴である。

【0029】次に、動作について説明する。まず、屈折率の異なる媒質からなる周期構造によって形成された光導波路の性質について説明する。先の川上らの文献に示されているように、屈折率の異なる媒質から構成された、光の波長オーダーの周期構造からなるフォトニック結晶によって構成された光導波路は、急峻な曲がりに対しても損失なく光を伝播することが可能である。フォトニック結晶を構成する媒質のうち少なくとも1つは、電気光学効果を有するため信号電極に電気信号を入力すると、入力電気信号に応じた電界が光導波路に印加され、電界に応じた屈折率変化が生じる。

【0030】電界を印加するほうの光導波路2は遅延線部12を有している。図6に遅延線部の拡大図を示す。この光導波路も遅延線部を有しない光導波路と同様にフォトニック結晶で形成されているので、光は、上述のように、遅延線部12の急峻な曲がり部分でも損失なく伝播することができる。遅延線部を含まない光導波路1を伝播した光と、遅延線部12を含む光導波路2を伝播した光とを合波させることにより、干渉を生じさせ、位相変化を強度変化に変えることができる。このとき、電気信号の伝播速度と光導波路を伝播する光信号の伝播速度とが合うように、遅延線部を設けて伝播時間を調整することにより、高周波の電気信号でも忠実に光信号に変換することができる。

【0031】高周波の電気信号を入力した場合に出力される、変換された光信号の波形は、図3の実施の形態1における出力波形と同様に、便宜的に3つの区間に分けて考えることができる。本実施の形態2においても、図3と同様に、各区間内では電気信号と光信号とのずれが生じず、印加した電気信号と同じ波形の位相変化とすることができる。

【0032】このように、本実施の形態の光変調器では、電気信号の伝播速度と、光導波路における光信号の伝播速度が合うように、光遅延線にて伝播時間を適切に調節している。このため、各区間で電気信号と光信号とのずれが生じず、高周波の電気信号に対しても忠実に光信号に変換することができる。また、電気信号と光信号とのずれが生じないため、光導波路を長くして、光導波路の単位長さ当りの位相変化を小さくすることができる。このため、電極に印加する電圧を小さくことができ、出力の小さい駆動回路でも十分変調をきかせて駆動することができるようになる。

【0033】(実施の形態3)図7は、本発明の実施の形態3における光変調器を説明する模式図である。本実施の形態における光変調器は、少なくとも1種類の電気光学効果を有する媒質を含む屈折率の異なる複数の媒質が周期構造をなした第1の光導波路1と、第1の光導波

路と異なる結晶配列19を有する第2の光導波路2とを備えている。第1の光導波路と異なる結晶配列とは、たとえば、第1の光導波路の周期構造を崩して欠陥を導入した結晶配列等をいう。また、この光変調器は、図7に示すように、光導波路1に電界を印加して、周期構造によって形成されるバンドギャップを変化させる電極とを備えている。この周期構造の周期は、変調をかける対象の光の波長以下である。なお、電極は、光導波路に電界を印加するための信号電極5と、信号電極を伝播する電気信号と電界的に結合し、コプレーナ線路を形成するように構成されたグランド電極7を備えている。信号電極5は、光導波路1に電界をかけることができれば、光導波路2に電界がかかってもよい。

【0034】図8は、フォトニック結晶の分散関係を示す図である。この図に示すように、電界を印加することによりフォトニック結晶のバンドギャップを変えることができれば、電界印加前には禁止帯にない角周波数 $\omega$ の光を、電界を印加することによりバンドギャップ内の禁止帯の光とすることができる。このため、Y分岐部3から分岐した第1の光導波路1を伝播していた光は、電界を印加されることによって伝播できなくなり、第2の光導波路にまわる。

【0035】第2の光導波路として、フォトニック結晶内に、たとえば、周期構造を形成しない欠陥路を設ければ、光導波路1の伝播を禁止された光がその欠陥路にまわり強度が増大した光が第2の光導波路を伝播する。したがって、電界を印加する前は、第2の光導波路である欠陥路を伝播していた光の強度は小さかったのに対して、電界を印加された後は、欠陥路の出力ポートから出力される光強度は大きくなる。

【0036】このように、フォトニック結晶により形成された光導波路の導波条件を、電界を用いて変えるため、電子の移動時間等に関係なく、高周波の電気信号により忠実に光信号を変換することができる。

【0037】なお、図7では光導波路として直線の例を示したが、図9に示すように、曲がり導波路を導入して、光導波路の入力部と出力部とがオフセットすることにより、より大きな光出力変化、すなわち高効率な光変調を行うことができる。

【0038】(実施の形態4)図10は、本発明の実施の形態4における光変調器を説明する図である。本実施の形態における光変調器は、屈折率の異なる複数の媒質が周期構造をなして形成した光導波路1と、この光導波路に電界を印加して周期構造に起因するバンドギャップを変化させる電極5、7とを備えている。周期構造の周期の長さは変調対象の光の波長以下である。光導波路の出射端面10aは、光導波路の延びる方向に対して斜めに傾斜している。ここで出射端面は光導波路の延びる方向に対して垂直であってはならない。先に説明したように、屈折率の異なる媒質から構成される光の波長オーダ



一の周期構造を有するフォトニック結晶は、高い分散性を有する。この分散性はフォトニック結晶のバンドギャップを変えることにより、明確に変えることができる。すなわち、印加電圧によってバンドギャップを変えることによりフォトニック結晶の屈折率を変えることができる。

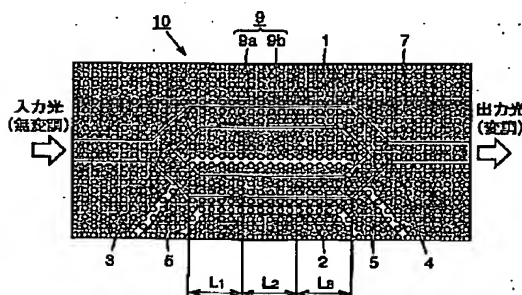
【0039】次に、この光変調器について説明する。図10示すように、光導波路の出射端面は、光導波路の延びる方向に対して斜めに傾いている。このため、印加電圧によりバンドギャップを変え、フォトニック結晶の屈折率を変えると、出射角が変化する。光導波路1の屈折率が $n_1$ で、その出射端面10aに接する媒質の屈折率が $n_2$ のとき、 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ の関係が成り立つ。したがって、 $\theta_1$ と $n_1$ とを変化させずに $n_1$ を変化させることにより、 $\theta_2$ を変えることができる。なお、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 出射端面10aの法線と光とのなす角度である。図10示すように、出射後の光が集光レンズ21を通して、光ファイバ22の受光系によって受光されるように構成すれば、わずかな角度変化でも大きな光出力変化が生じる。この結果、高効率な光変調を行うことができる。

【0040】このように、フォトニック結晶により形成された光導波路の導波条件は、電界を用いて変えているため、電子の移動時間等に関係なく、高周波の電気信号でも忠実に光信号に変換できる光変調器を得ることができる。また、光学系により、光の出射角変化を光ファイバへの結像点の位置ずれに拡大することができるので、必要な角度変化、すなわち屈折率変化が小さくてもよいので駆動電圧の小さい駆動回路で駆動することができる。

【0041】上記において、本発明の実施の形態について説明を行ったが、上記に開示された本発明の実施の形態は、あくまで例示であって、本発明の範囲は、これら発明の実施の形態に限定されない。本発明の範囲は、特許請求の範囲の記載によって示され、さらに特許請求の範囲の記載と均等の意味および範囲内でのすべての変更を含んでいる。

\*

【図1】



\*【0042】

【発明の効果】本発明の光変調器を用いることにより、電気信号をその電気信号の波形に忠実な光強度信号に変換することが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施の形態1における光変調器を示す図である。

【図2】 図1の光変調器が形成されるフォトニック結晶の周波数-波動ベクトル（バンド）図である。

10 【図3】 実施の形態1における電界強度と光信号の位相変化との関係を示す図である。

【図4】 本発明の実施の形態1における別の光変調器を示す図である。

【図5】 本発明の実施の形態2における光変調器を示す図である。

【図6】 図5の光変調器における遅延線を示す図である。

【図7】 本発明の実施の形態3における光変調器を示す図である。

20 【図8】 図7の光変調器が形成されるフォトニック結晶の周波数-波動ベクトル図を示す図である。

【図9】 本発明の実施の形態3における他の光変調器を示す図である。

【図10】 本発明の実施の形態4における光変調器を示す図である。

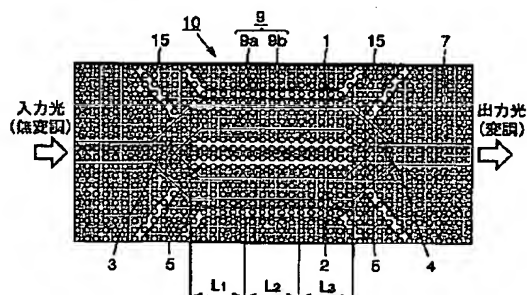
【図11】 従来の光変調器を示す図である。

【図12】 図11の光変調器における電界強度と光信号の位相変化との関係を示す図である。

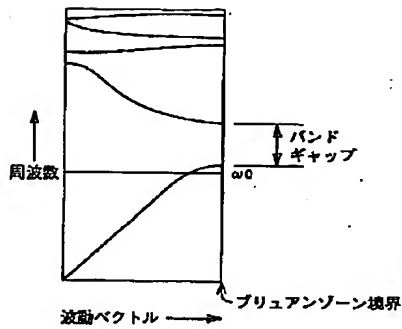
【符号の説明】

30 1, 2 光導波路、3 Y分岐部、4 Y合波部、5, 15 信号電極、7 グランド電極、9 フォトニック結晶、9a 高屈折率媒質、9b 低屈折率媒質、10 光変調器、12 遅延線部、19 光導波路と異なる結晶配列を有する光導波路部分、21 集光レンズ、22 光ファイバの受光部、L1, L2, L3 便宜上分けられた光導波路の区間。

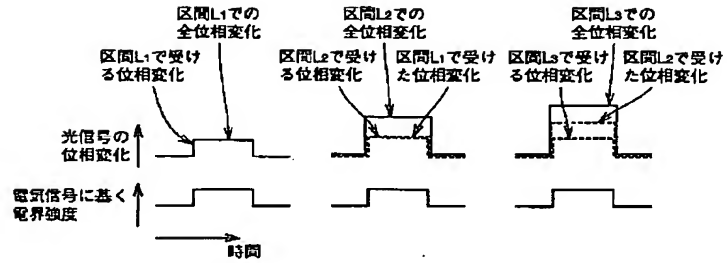
【図4】



【図2】

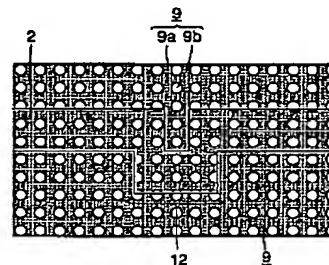
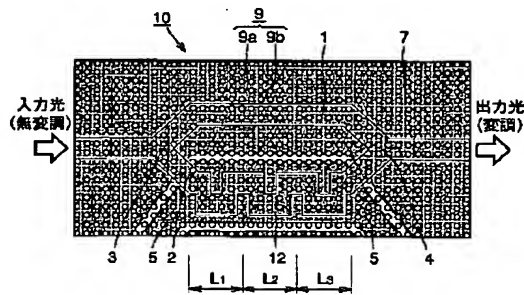


【図3】



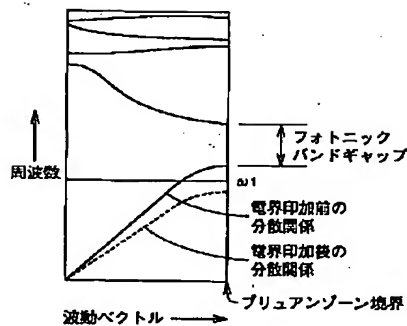
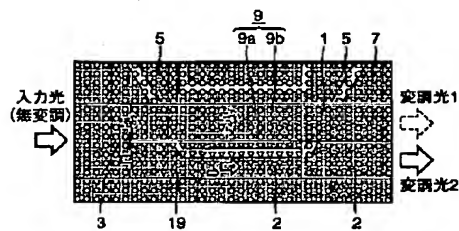
【図5】

【図6】



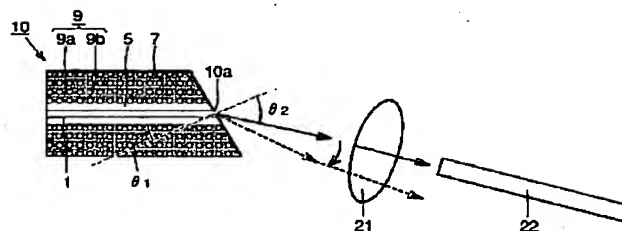
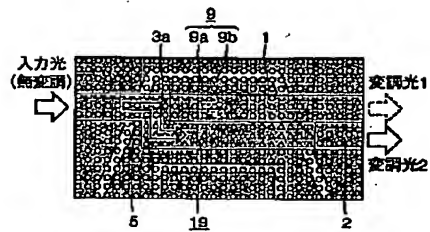
【図7】

【図8】

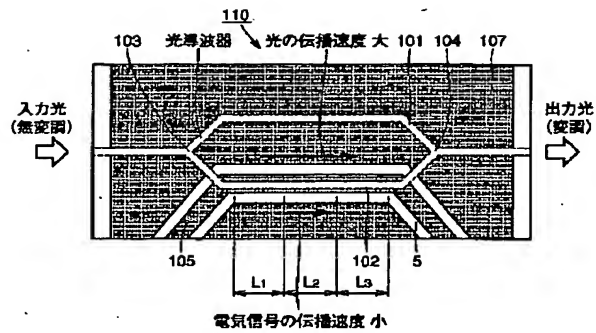


【図9】

【図10】



【図11】



【図12】

